



Anejo nº 5

CLIMA MARÍTIMO. CARACTERIZACIÓN Y PROPAGACIÓN DEL OLEAJE

AMPLIACIÓN SUR DEL PUERTO DEPORTIVO Y PESQUERO DE LAS CASAS DE
ALCANAR

Autor: Guillermo Fernández Darder

Índice:

1. Introducción	4
1.1. Variación del nivel del mar	4
1.2. Clima marítimo	4
2. Zonificación litoral	6
3. Atlas marítimo	7
4. Las rosas del Oleaje	12
5. Caracterización del oleaje	12
6. Propagación del oleaje	16
6.1. Asomeramiento	19
6.2. Difracción	21

Índice de imágenes

1. Imagen 1: Intensidad del oleaje	12
2. Imagen 2: Análisis de la zona VII para el oleaje tipo sea y tipo swell	12
3. Imagen 3: Análisis de la zona VIII para el oleaje tipo sea y tipo swell	13
4. Imagen 4: Direcciones significativas del oleaje en el área VII y en el área VIII	13
5. Imagen 5: Localización de la boya de Tarragona	15
6. Imagen 6: Probabilidad de excedencia anual según la altura de ola significativa	16
7. Imagen 7: Altura de ola significativa según la dirección de procedencia	17
8. Imagen 8: Datos de la boya de Tarragona	18
9. Imagen 9: Cálculo de la altura significativa con el programa de la Universidad de Delaware “Wave Calculator” (I)	19
10. Imagen 10: Cálculo de la altura significativa con el programa de la Universidad de Delaware “Wave Calculator” (II)	20
11. Imagen 11: Cálculo del oleaje con los Ábacos de Wiegel (I)	21
12. Imagen 12: Cálculo del oleaje con los Ábacos de Wiegel (II)	22
13. Imagen 13: Cálculo del oleaje con los Ábacos de Wiegel (III)	22

Índice de tablas

1. Tabla 1: Zonificación del litoral español a efecto de caracterización del clima marítimo	6
2. Tabla 2: Área VII. Regímenes medios direccionales, correlaciones altura de ola-periodo en temporales y estructura espectral escalar básica de temporales	8



3. Tabla 3: Área VII. Rosa de los vientos, regímenes medios escalares y regímenes extremos escalares	9
4. Tabla 4: Área VIII. Regímenes medios direccionales, correlaciones altura de ola-periodo en temporales y estructura espectral escalar básica de temporales	10
5. Tabla 5: : Área VIII. Rosa de los vientos, regímenes medios escalares y regímenes extremos escalares	11

1. INTRODUCCIÓN

En este anejo se va a emplear la ROM 0.3-91, especialmente el Anejo 1: Clima marítimo en el litoral Español, aunque los cálculos de la caracterización del oleaje y su propagación se van a hacer con la información de la página web de Puertos del Estado, ya que la información es más reciente.

1.1. VARIACIÓN DEL NIVEL DEL MAR

En la variación del mar se van a considerar dos tipos de mareas:

- Las mareas astronómicas: con las observaciones de Margalef Herrera en 1961. de esto se puede observar que en el litoral del levante, la variación máxima es de 50 cm con unos valores normales de 15 – 20 cm. Se nota que son acciones consideradas dentro del oleaje general.
- Las mareas meteorológicas: este tipo de mareas suele aparecer en el fenómeno de “gota fría”. Se obtiene para un periodo de retorno igual a la vida útil (25 años) una sobre elevación de 50cm, mientras que con un periodo de retorno de 2 años la misma sobre elevación alcanza sólo los 30 cm. No obstante, la ROM 0.2-90 nos recomienda el valor de 0,6m. Por lo tanto vamos a adaptar este valor de 0,6m.

1.2. CLIMA MARÍTIMO

El anejo que se va a utilizar de la ROM 03-91, Clima Marítima en el litoral Español, establece, a los efectos de caracterización del clima marítimo, una diferenciación del litoral español en diez áreas distintas, definidas en base a características climáticas homogéneas, a la configuración de la costa y al emplazamiento de la información instrumental disponible. Fija la metodología de determinación del clima meteorológico para cada zona establecida en base al análisis estadístico de la información de oleaje disponible: datos visuales procedentes del Nacional Data Center de Asheville y Datos Instrumentales registrados por las boyas de la REDCOS, definiendo las características técnicas de la misma.

La definición del clima marítimo se lleva a cabo obteniendo las siguientes relaciones de caracterizaciones del oleaje en cada una de las áreas definidas:

- La distribución conjunta de ola visual / dirección, en forma de rosas de oleaje. Se agrupan los datos que provienen de oleajes tipo sea (mar de viento) y swell (mar de fondo) en sección de 22,5° de amplitud.
- Las frecuencias de presentación sectoriales.



- ✚ Análisis estadístico unidimensional de la variable altura de ola significativa (con datos instrumentales) o visual (con datos visuales) para los dos tipos de regímenes: medios y extremales.
- ✚ Análisis estadístico bidimensional para condiciones de temporal de la altura de ola significativa / periodo medio y periodo medio / periodo pico.
- ✚ Análisis estadístico espectral orientado a la obtención de una estructura espectral escalar básica de oleaje representativa del mismo en condiciones de temporal.

Para efectuar el análisis escalar de la altura de ola significativa, se va a utilizar la información registrada en las boyas de la REMRO

2. ZONIFICACIÓN DEL LITORAL:

La ROM 0.3-91 establece una zonificación del litoral Español en diez áreas diferenciadas, definidas en base a características climáticas homogéneas, a la configuración de la costa y al emplazamiento de las fuentes de información disponible.

Eso permite aceptar que las características del oleaje en aguas profundas son aproximadamente las mismas en aquellas partes de cada área que se encuentren afectadas por los mismos oleajes.

En la siguiente tabla extraída de la ROM, tenemos esta zonificación así como las coordenadas geográficas límites de cada una de las áreas correspondientes: paralelas entre ellas y a la línea de costa, se han prolongado paralelamente para tener los datos necesarios para para los cálculos del proyecto.

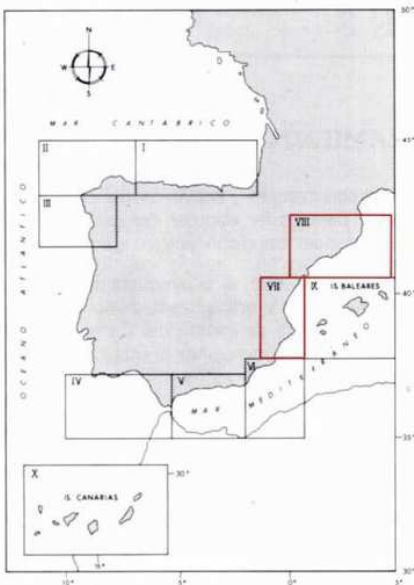
TABLA 2.2.1. ZONIFICACION DEL LITORAL ESPAÑOL A EFECTOS DE CARACTERIZACIÓN DEL CLIMA MARÍTIMO		
ÁREA	CUADRÍCULA	
I	43° N - 45° N 1,5° W - 7° W	
II	43,2° N - 45° N 7° W - 11° W	
III	41,5° N - 43,2° N 8° W - 11° W	
IV	35° N - 37,1° N 5,6° W - 10° W	
V	35° N - 37° N 2° W - 5,6° W	
VI	35° N - 38° N 2° W - 2° E	
VII	37,8° N - 40,5° N 1° W - 2° E	
VIII	40,5° N - 42,5° N 0,0° W - 4,5° E	
IX	38,3° N - 41° N 0,5° E - 5,5° E	
X	26,5° N - 30,5° N 12° W - 20° W	

Tabla 1: Zonificación del litoral español a efectos de caracterización del clima marítimo










Las Coordenadas del puerto de Las Casas de Alcanar son 40° 33' 2" N - 0° 32' E, por lo tanto se encuentra en la frontera entre la zona VII y la zona VIII. De esta manera se utilizarán ambas zonas.

3. ATLAS MARÍTIMO

En el anejo 1 de la ROM, se puede encontrar al final del libro las diferentes características relativas a cada área. Estos datos caracterizan los oleajes por análisis estadístico de las informaciones disponibles.

Aparecen las direcciones significativas, la localización, las observaciones visuales así como los varios registros instrumentales. A continuación se muestran estas diferentes tablas, primero para el área VII y después para el área VIII.

En cada una de estas tablas se pueden encontrar las siguientes características:

-  Direcciones significativas
-  La localización de la información instrumental
-  La información analizada
-  Las observaciones visuales: las rosas de oleaje
-  Las observaciones visuales: los regímenes medios direccionales
-  Los registros instrumentales: los regímenes medios escalares
-  Los registros instrumentales: los regímenes extrémale escalares
-  Los registros instrumentales: correlación altura de ola / periodo en temporales
-  Los registros instrumentales: estructura espectral escalar básica de temporales ($H_s > 1\text{m}$)

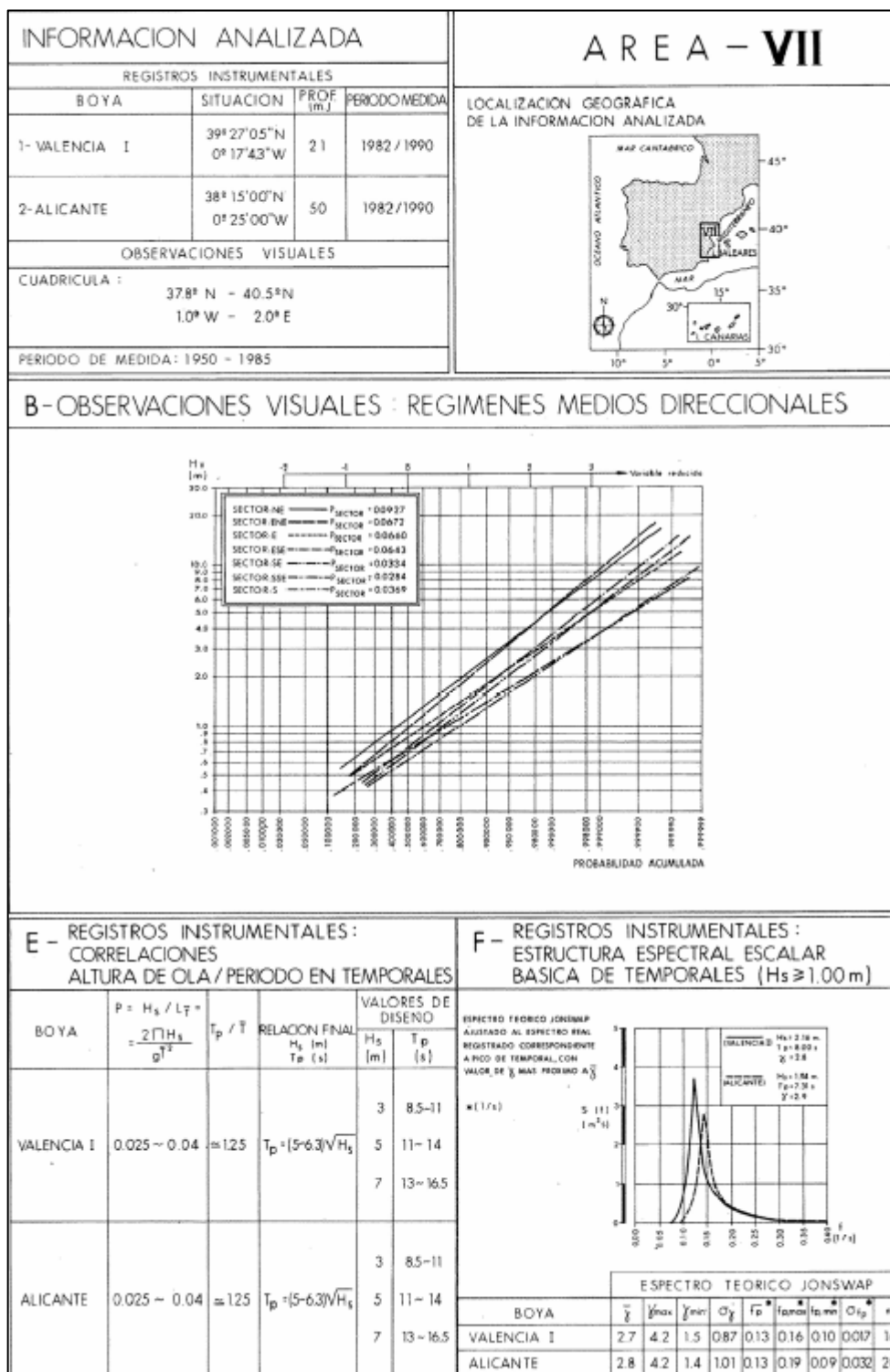


Tabla 2: Área VII. Regímenes medios direccionales, correlaciones altura de ola-periodo en temporales y estructura espectral escalar básica de temporales

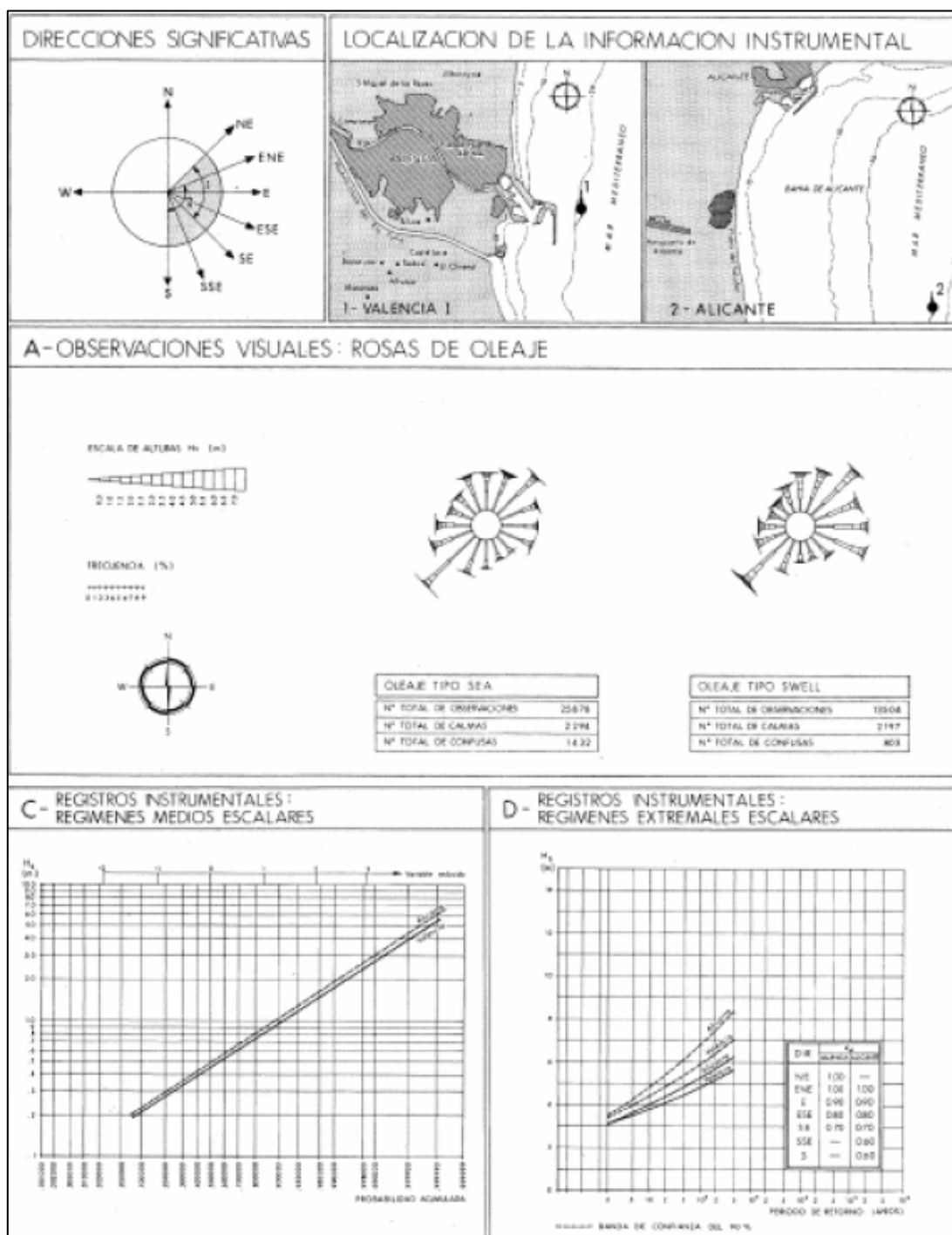


Tabla 3: Área VII. Rosa de los vientos, regímenes medios escalares y regímenes extremos escalares

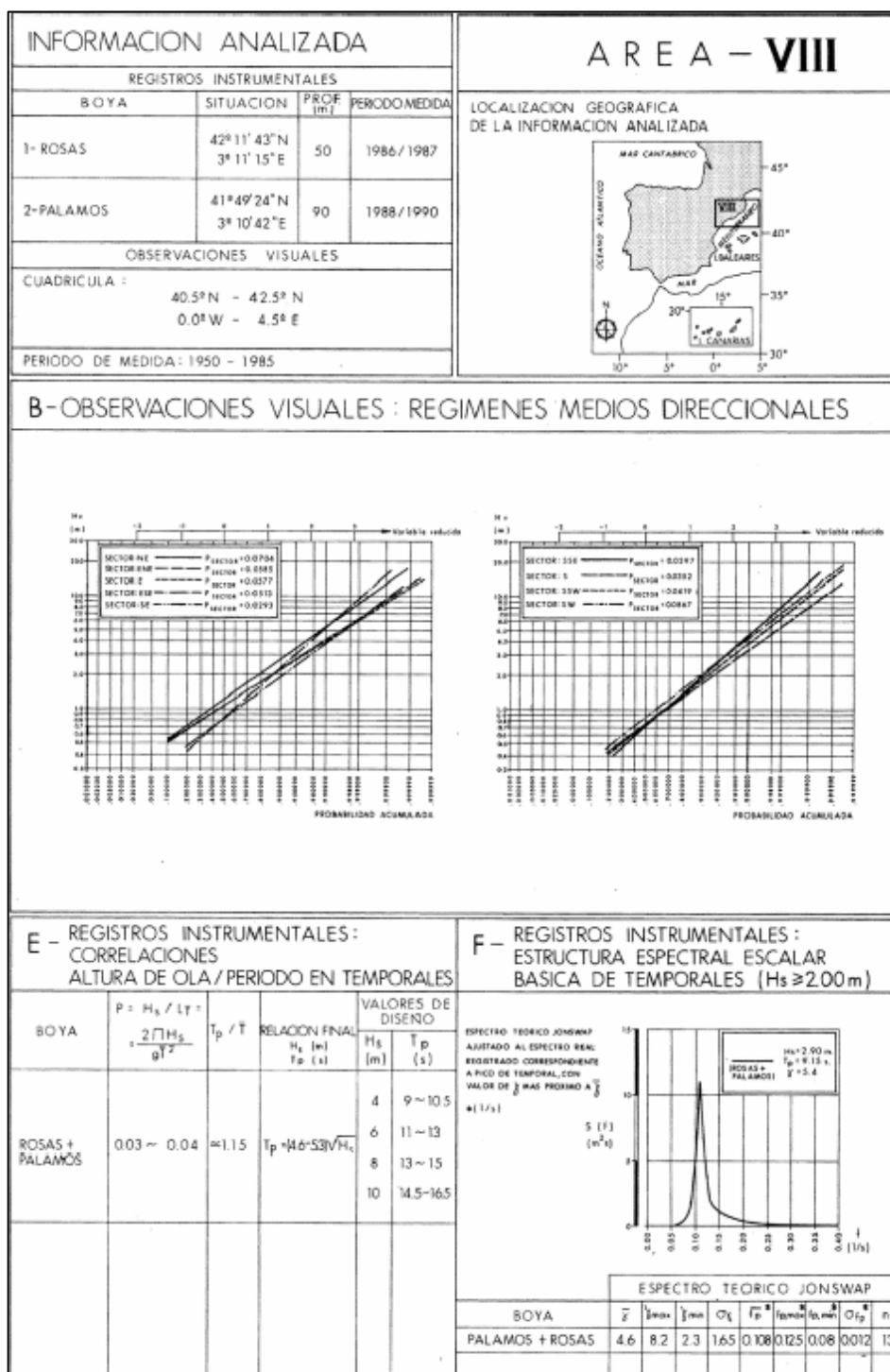


Tabla 4: Área VIII. Regímenes medios direccionales, correlaciones altura de ola-periodo en temporales y estructura espectral escalar básica de temporales

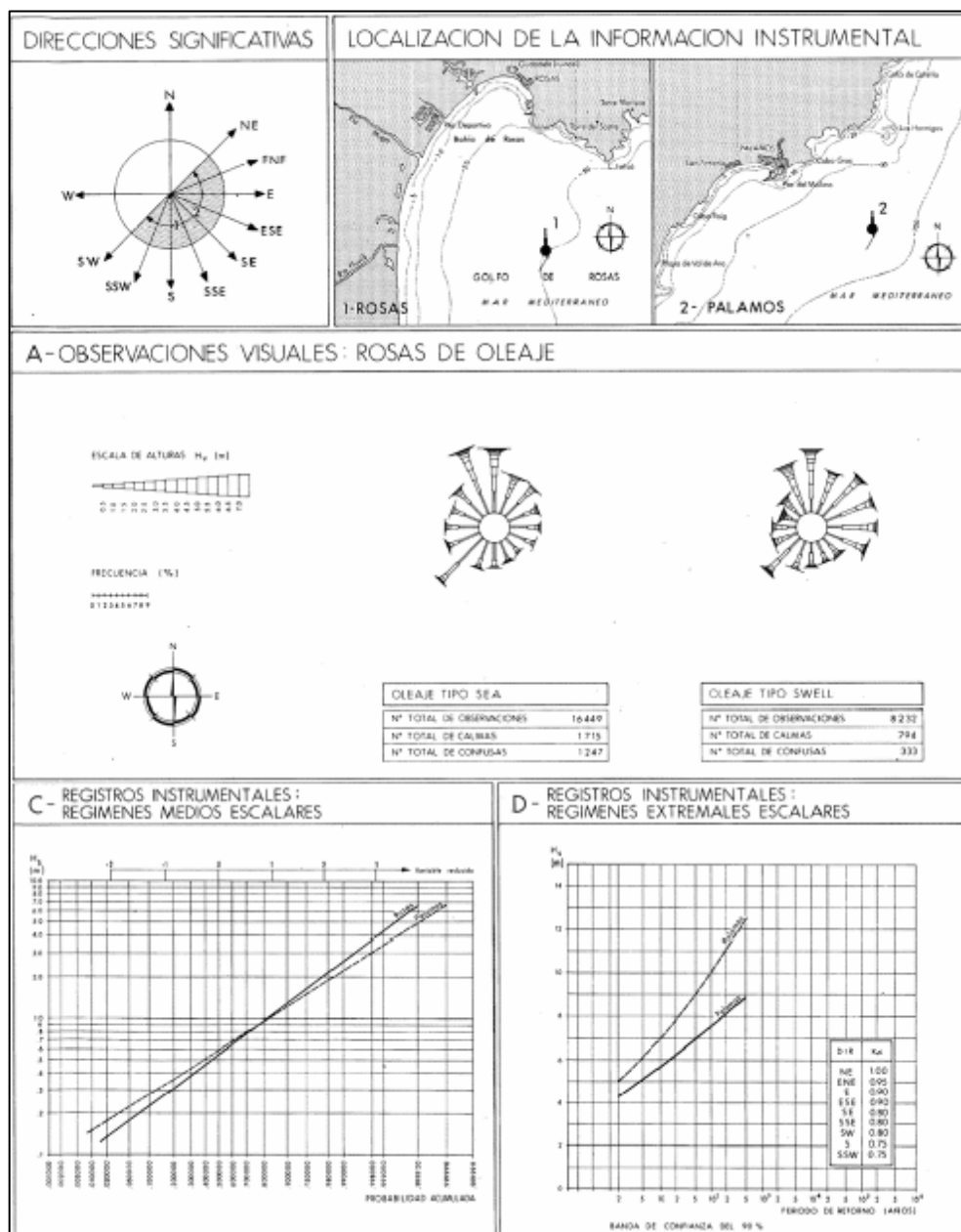


Tabla 5: Área VIII. Rosa de los vientos, regímenes medios escalares y regímenes extremos escalares

4. LAS ROSAS DEL OLEAJE

Para las rosas de oleajes, se recomiendan amplitudes de 22.5° e intervalos de altura de ola de 0.5m. Para cada intervalo, de altura y sector, la frecuencia de presentación se haya como el cociente entre la suma de observaciones en este intervalo de altura de ola en todas las direcciones contenidas en este sector y el número total de observaciones válidas.

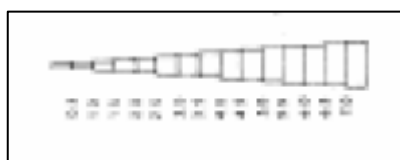


Imagen 1: Intensidad del oleaje

Gracias a las rosas de Oleaje, se puede determinar de forma bastante aproximada las características de los oleajes:

- ✚ La dirección de los más frecuentes: depende de la longitud de la rama.
- ✚ La intensidad: según la anchura del brazo.

En nuestro caso se van a analizar para las zonas VII y VIII, tanto para los oleajes de tipo sea (a la izquierda) como de tipo swell (a la derecha):

Para este proyecto, dado su situación geográfica, vamos a utilizar los datos de las boyas de Valencia y la de Palamós para las zonas VII y VIII respectivamente.

Para la zona VII:



Imagen 2: Análisis de la zona VII para oleaje tipo sea (izquierda) y tipo swell

Para la zona VIII:



Imagen 3: Análisis de la zona VIII para oleaje tipo sea (izquierda) y tipo swell

Para utilizar estos datos debemos comparar a la vez las direcciones significativas de los oleajes que aparecen en estas mismas páginas:

Tenemos a la izquierda las direcciones del área VII y a la derecha las del área VIII.

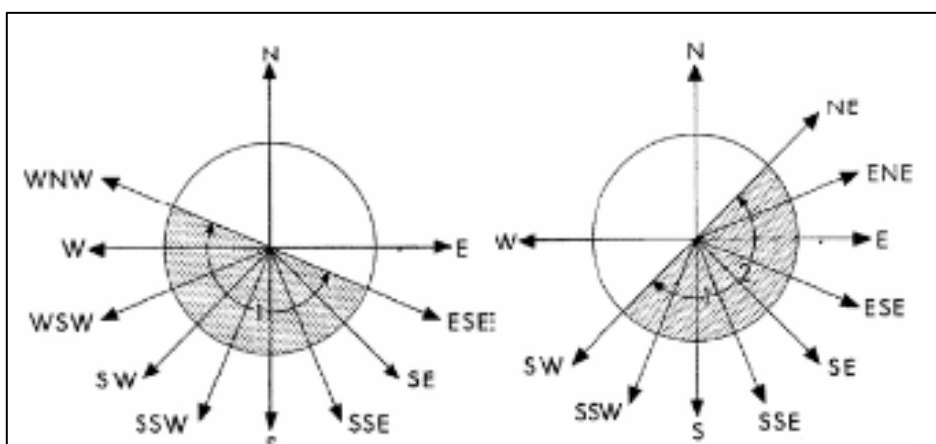


Imagen 4: Direcciones significativas del oleaje en el área VII (izquierda) y en el área VIII

Al analizar estas rosas, nos damos cuenta que para la zona VII, los oleajes más frecuentes son los del SW tanto para los sea que para los swell. Por otro lado se nota que para los swell, hay una parte importante de los oleajes que proviene de la zona Norte/Este. Se puede ver que los oleajes que provienen del SW no tienen una incidencia muy importante ya vienen de las tierras y no del mar.

En cuanto a las rosas de la zona VIII, son más presentes los oleajes de origen N y N NW. Para los swell, las direcciones se concentran sobre todo entre el Este y el Norte.



En resumen, para dicho proyecto, dado el análisis de las rosas de oleajes y la situación geográfica del puerto (la costa tiene más o menos una orientación SW / NE), las direcciones relevantes son para la boya de Valencia y para la boya de Palamós:

NE, ENE, E, ESE, SE, SSE, S, SSW y SW

Aun teniendo todas estas direcciones, se van a despreciar las direcciones de ESE, SE, SSE, S, SSW y SW por limitaciones geográficas, por lo que las direcciones resultantes más relevantes serán:

NE, ENE, E

5. CARACTERIZACIÓN DEL OLEAJE

Para abordar esta parte del anejo, se va comenzar consultando la página web de Puertos del Estado. De ella se ha obteniendo información en tiempo real de las condiciones de oceanográficas y meteorológicas necesarias para poder caracterizar el oleaje de la zona a estudiar.

La información necesaria se encuentra en: www.puertos.es → Oceanografía y meteorología → Datos en tiempo real

Se obtienen los datos históricos de oleaje refiriéndose en el mapa según el código de nuestra Boya del Estado, la Boya de Tarragona.



Imagen 5: Localización de la boya de Tarragona

La caracterización del oleaje va a servir principalmente para conocer el comportamiento del oleaje y para conocer la altura de ola significativa en la boya, y con ésta poder propagarla para poder diseñar y dimensionar los diques del puerto.

Para llegar a ello se va a trabajar con el Régimen Extremal, ya que este representa las peores condiciones posibles bajo las que estarán sometidos los diques. Los diques que se van a proyectar serán diques en talud que se diseñan para un periodo de retorno de 100 años.

En el banco de datos oceanográficos de Puertos del Estado encontraremos los registros y previsiones de la boya con la que estamos trabajando.

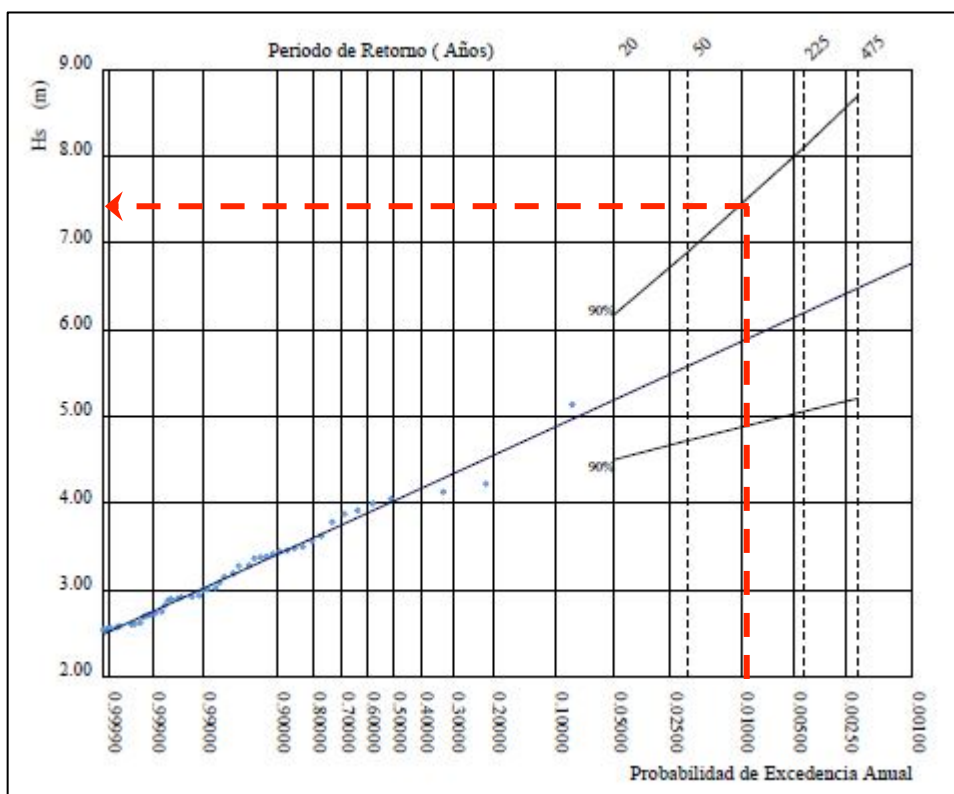


Imagen 6: Probabilidad de excedencia anual según la altura de ola significativa

El objetivo es caracterizar el oleaje para el periodo de retorno de 100 años, que resulta de una probabilidad de excedencia de 0,01.

Al disponer de información probabilística, va a haber una incertidumbre asociada, por ello se escogerá la mayor altura de ola significativa: aproximadamente 7,4 metros.

En función de la Altura Significativa (H_s) se puede hallar el periodo pico (T_p) mediante la siguiente fórmula que proviene del documento extraído de la página web de Puertos de Estado.

$$T_p = 3.74H_s^{0.56} = 11.47s$$

Para terminar de caracterizar el oleaje necesitamos conocer su dirección, para ello hace falta consultar el Informe climático de Régimen Medio o Estacionario donde aparece una tabla que relaciona la Altura Significativa con la Dirección de Procedencia. Es necesario trabajar con la mayor Altura Significativa aunque su frecuencia sea baja, ya que esta la que pondrá en peligro la integridad del dique.

Tabla Altura Significativa (Hs) - Dirección de Procedencia en %

Dirección	Hs (m)												Total
	≤ 0.2	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	> 5.0	
CALMAS	5.821												5.821
N 0.0		.079	.472	.389	.234	.063	.033	.004	-	-	-	-	1.274
NNR 22.5		.100	.464	.251	.175	.060	.017	-	-	-	-	-	1.067
NE 45.0		.167	.719	.447	.263	.109	.025	.008	.004	-	.004	-	1.747
ENE 67.5		.740	2.444	1.939	1.241	.723	.364	.159	.067	.017	.004	-	7.697
E 90.0		2.866	6.372	2.649	1.124	.318	.138	.025	.013	-	-	-	13.505
ESE 112.5		3.932	4.471	.961	.171	.033	.029	.008	-	-	-	-	9.606
SE 135.0		3.878	2.424	.288	.054	.017	-	-	-	-	-	-	6.661
SSE 157.5		4.070	2.549	.217	.075	.013	.004	.004	-	-	-	-	6.932
S 180.0		5.395	4.864	.698	.242	.109	.021	.004	-	-	-	-	11.533
SSW 202.5		3.305	4.638	1.467	.522	.142	.096	.029	.013	-	-	-	10.212
SW 225.0		1.141	1.826	.602	.134	.079	.025	.004	-	-	-	-	3.811
WSW 247.5		.501	1.212	.435	.130	.046	.013	-	-	-	-	-	2.336
W 270.0		.685	1.759	.944	.422	.109	.013	.008	.008	.004	-	-	3.953
WNW 292.5		.468	2.812	2.444	1.575	.756	.226	.092	.008	-	-	-	8.382
NW 315.0		.209	1.542	1.195	.694	.284	.063	-	-	.004	-	-	3.990
NNW 337.5		.134	.577	.489	.188	.075	.021	-	-	-	-	-	1.483
Total	5.821	27.871	39.144	15.415	7.246	2.925	1.086	.347	.113	.025	.008	-	100 %

Imagen 7: Altura de ola significativa según dirección de procedencia

Por lo tanto, la mayor altura significativa que es de 5 m, tendrá una frecuencia de 0,004 en cada una de sus direcciones, NE 45 y ENE 67,5.

También se puede observar una menor altura significativa de 4 m con distintas frecuencias en las que se puede destacar la dirección E 90, ya que las demás direcciones no afectan por limitaciones geográficas o son las dos anteriores que aparecen en la altura significativa de 5m

.Estas direcciones como se puede observar coinciden con algunas de las direcciones resultantes más relevantes de la ROM 0.3-91, obtenidas a partir de las dos boyas, la de Valencia y la de Palamós.

6. PROPAGACIÓN DEL OLAJE

La propagación del oleaje se refiere a los cambios que le acontecen al abandonar el área de generación. Estos cambios en el avance del oleaje son el asomeramiento, la refracción, la difracción y la reflexión.

Se va a empezar averiguando la profundidad de la boya escogida: Boya de Tarragona (Información de la boya)


Longitud:	1.47° E	
Latitud:	40.68° N	
Cadencia:	1 Hor	
Profundidad:	688 m	
Fecha primer dato :	19-08-2004	
Último dato disponible:	21-04-2014	
Tipo de sensor:	Direccional Oce-Met.	
Modelo:	SeaWatch	
Comentarios:	Ligeros cambios de posición en sept/05 y nov/07	
Conjunto de Datos:	REDEXT	

Imagen 8: Datos de la boya de Tarragona

Como se observa en el cuadro de información, la boya se encuentra a una profundidad de 688 m, por lo tanto nos encontramos con profundidades indefinidas ($d/L < 1/2$) donde el oleaje se propaga libremente sin estar afectado por el rozamiento del fondo. Se puede observar e intuir en los mapas que a medida que el oleaje se aproxima a la costa se encuentra con el Delta del Ebro.

Para el planteamiento de la propagación se supondrán las líneas batimétricas rectas y paralelas a la línea de costa, ya que si no habría que utilizar modelos numéricos para el cálculo de la misma, y así, de esta manera es posible utilizar el programa "Wave Calculator" para calcular el asomeramiento y los "Ábacos de Wiegel" para la difracción.

Con estas características, los cambios que sufrirá el oleaje debidos a la propagación serán los debidos al asomeramiento y a la difracción, producidos por la disminución de profundidad al acercarnos a la costa y por la obstaculización del Delta del Ebro en las direcciones del oleaje.

A continuación se va a calcular el asomeramiento de la direcciones ENE y E, ya que la dirección NE se reduce significativamente respecto de éstas por la

difracción en el Delta del Ebro; y también se va a calcular la difracción de la dirección ENE en el delta.

6.1. ASOMERAMIENTO

Para el cálculo del dique se busca conocer la altura de ola después del asomeramiento. Para ello es necesaria la Altura Significativa (H_s), el periodo pico de la ola (T_p), el ángulo entre la perpendicular a las batimétricas y la dirección del oleaje (α) y la profundidad de cálculo (h).

El ángulo se puede calcular sabiendo la dirección del oleaje (ENE y E) y la orientación de la costa (N37), por lo tanto el ángulo de la dirección del oleaje con la perpendicular a las líneas batimétricas será 59° en el caso de la dirección ENE y 37° en el de la E.

En cuanto a la profundidad de cálculo, va a depender de la localización del dique, el cual se encuentra a una profundidad de $h=6$ m.

Tras disponer de todos los datos, se utilizará el programa 'Wave Calculator' de la Universidad de Delaware para el cálculo del asomeramiento, al que se introducirán los siguientes datos:

$$H_s = 7,4 \text{ m}$$

$$\alpha = 59^\circ/37^\circ$$

$$T_p = 11,47 \text{ s}$$

$$h=6 \text{ m}$$

Deep Water Values:		L (m) =	85.331
Wave Height (m)?	7.4	$k=2\pi/L =$	0.07363243
Period	11.47	$C=L/T =$	7.439
Wave Angle (°)?	59	$C_g =$	6.996
Local Depth?	6	$n=C_g/C =$	0.9404845
		$K_s =$	1.131
		$K_r =$	0.742
		Angle =	20.844725
		H =	4.8, breaking
		$u_b \text{ (m/s)} =$	2.881
Calculate	Reset	$E \text{ (N-m/m}^2\text{)} =$	28252.802
		$E_f \text{ (Watts/m)} =$	197656.597
		$K_p =$	0.909

Imagen 9: Cálculo de la altura significativa con el programa de la Universidad de Delaware "Wave Calculator"

Deep Water Values:		L (m) =	85.331
Wave Height (m)?	7.4	k=2 pi/L =	0.07363243
Period	11.47	C=L/T =	7.439
Wave Angle (o)?	37	Cg =	6.996
Local Depth?	6	n= Cg/C =	0.9404845
		Ks =	1.131
		Kr =	0.908
		Angle =	14.467569
		H =	4.8, breaking
		u_b (m/s) =	2.881
Calculate	Reset	E (N-m/m^2) =	28252.802
		E_f (Watts/m) =	197656.597
		K_p=	0.909

Imagen 10: Cálculo de la altura significativa con el programa de la Universidad de Delaware "Wave Calculator"

El output del programa es la altura de ola de cálculo cuando esta alcanza el dique (H_s^*): Para ambos casos, e independientemente del ángulo, con $h = 6 \text{ m} \rightarrow H_s^* = 4,8 \text{ m}$.

Esta no será la altura real, ya que esta es la altura a la que rompe la ola, por lo tanto al tener este resultado se sabe que la ola habrá roto cuando impacte con el dique.

En cuanto a la ola de cálculo, al estar calculando un dique en talud trabajaremos con la $H (1/3)$, que es la media aritmética de las alturas del tercio de olas más altas de un registro de oleaje. El procedimiento alternativo a calcularla es multiplicar la altura de ola significativa por un coeficiente sacado de la distribución de Rayleigh (c). Desconocemos el coeficiente para $H (1/3)$, en su defecto usaremos el de los diques verticales 1,27.

Para $h = 6 \text{ m} \rightarrow H_c = c \times H_s^* = 1,27 \times 4,8 = 6,1 \text{ m}$.

Aun así, altura de ola de cálculo con el asomeramiento, se queda en 4,8m, que será con la que se va a dimensionar el Dique Este y el Contradique. Dicho dimensionamiento se va a realizar siguiendo las recomendaciones del Shore Protection Manual (1975), por lo tanto, no hará falta multiplicar la altura de ola de cálculo propagada por el coeficiente de Rayleig ya que estas recomendaciones no lo contemplan.

6.2. DIFRACCIÓN

Para el cálculo de la difracción se van a utilizar los Ábacos de Wiegel.

Se va a calcular solamente la difracción de oleaje de dirección ENE con el delta, ya que el oleaje con dirección NE por difracción con el delta hace que se reduzca significativamente respecto del de dirección ENE. Con el resultado de dicha difracción del oleaje se va a dimensionar el Dique Norte.

Por otra parte, no se va a calcular la difracción del oleaje de dirección E porque puede llegar directamente al puerto sin difractarse con el delta y encima es la más desfavorable para el cálculo del Dique Este y Contradique. Por este motivo se van a dimensionar ambos con la altura de ola de cálculo considerando sólo el asomeramiento y sin difracción.

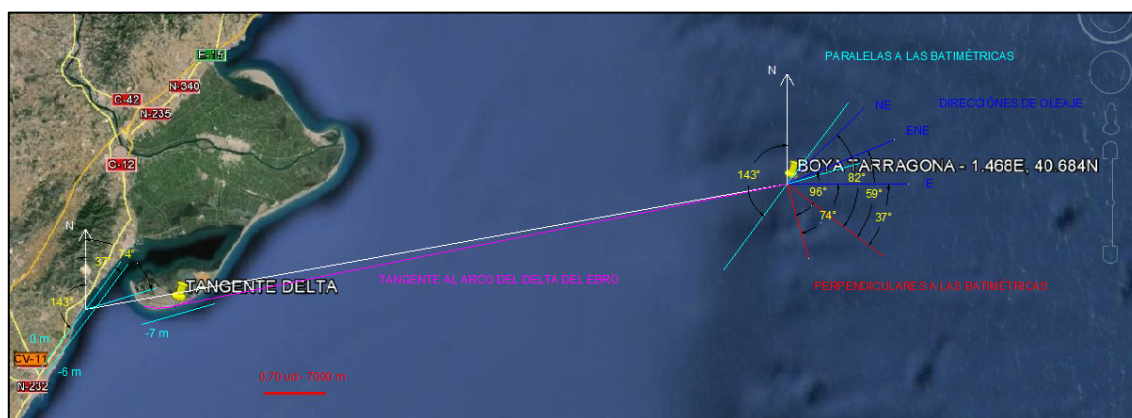


Imagen 11: Cálculo de la altura de ola significativa con los Ábacos de Wiegel (I)

Para el cálculo de la difracción del dique se ha hecho un arco imaginario en el Delta del Ebro y se ha trazado una tangente a dicho arco desde la Boya de Tarragona. El ábaco se ha colocado en dicha tangente como si fuera el dique y se ha llevado el oleaje sobre la tangente con la misma dirección.

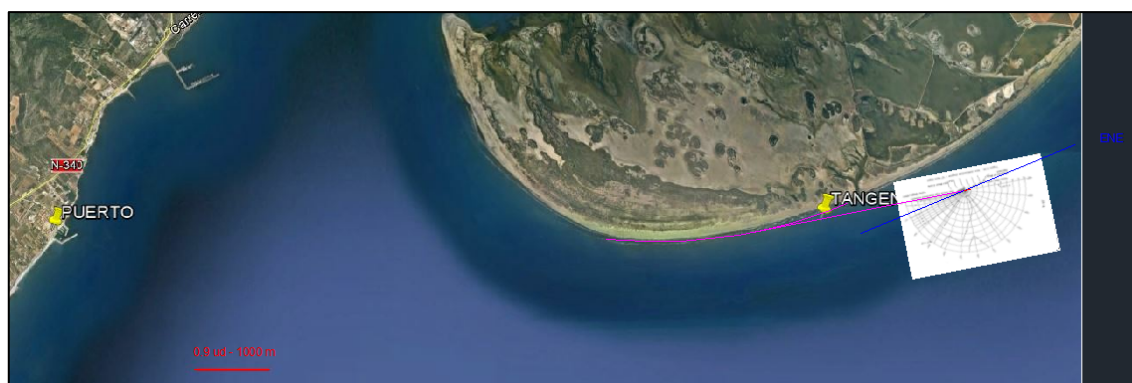


Imagen 12: Cálculo de la altura de ola significativa con los Ábacos de Wiegel (II)

Después se ha sobrepuesto el ábaco de Wiegel correspondiente en su correcta dirección y se ha escalado para poder observar correctamente el comportamiento que sufre la dirección y altura de ola debido a la difracción.

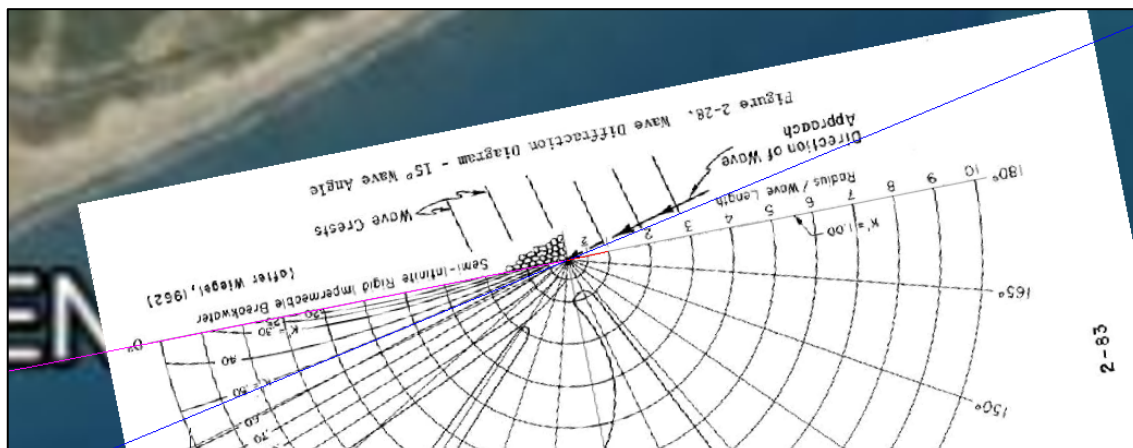


Imagen 13: Cálculo de la altura de ola significativa con los Ábacos de Wiegel (III)

Como se puede observar el coeficiente k_d es igual a 0,5, por lo tanto la altura de ola se va reducir aproximadamente a la mitad, de esta manera se quedará en 2,4m para dimensionar el Dique Norte.